

ОПТИМИЗАЦИЯ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНА СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ УЧЕТА ПРОСТРАНСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ

¹Мищенко В. Я., ¹Преображенский М. А., ¹Добросотских М. Г.

¹Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

e-mail: mishenko@vgasu.vrn.ru, pre4067@yandex.ru, dobrmax@yandex.ru

Аннотация. Сформулированы методы количественного описания опережения, совмещения и запаздывания строительных работ в пространстве и времени. Определена верхняя граница числа коэффициентов, описывающих пространственно-технологические связи работ. Получена полная система уравнений, описывающих условия полного выполнения работ в зависимости от способа их упорядочения. Определены ограничения на коэффициенты уравнений, учитывающие дискретный характер нескладируемых ресурсов, объемов работ и временных интервалов планирования. Проанализирован конкретный пример рационального выбора коэффициентов. Сформулирован алгоритм получения допустимых наборов коэффициентов, учитывающий наличие резервов времени выполнения различных этапов работ.

Ключевые слова: оптимизация, строительное производство, календарный план, ресурс, рациональное значение, резерв времени, оптимизация.

OPTIMIZATION OF THE CALENDAR PLAN FOR CONSTRUCTION WORKS

V. Ya. Mishchenko¹, M. A. Preobrazhenskii¹, M. G. Dobrosotskikh¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

e-mail: mishenko@vgasu.vrn.ru, pre4067@yandex.ru, dobrmax@yandex.ru

Abstract. This paper formulates some methods of quantitative description of construction works lead time, delay time and their reconciliation in space and time. The results presented define the top bound of number of coefficients, describing the spatial-technological work relations with a complete system of equations describing the conditions for construction works fulfillment depending on the ways of their organization. The paper presents the limitations on the coefficients of equations, taking into account the discrete nature of non-stock resources, work volumes and planning time slots. The specific example of the rational choice of coefficients has been analyzed. Algorithm for obtaining of allowable coefficients sets has been formulated, taking into account the availability of run-time reserves for various construction work stages.

Key words: optimization, construction work, schedule, resource, rational value, time reserve, coefficient of overlap.

1. Введение

Строительство, также как и любой коллективный труд нуждается в организации, планировании и управлении. В частности, необходимо согласование работ и ресурсов во времени и пространстве. Эту задачу на базе технической обусловленной последовательности процессов решает календарное планирование (в дальнейшем – КП). Особую важность оптимизации КП придает высокая стоимость строительных проектов и связанные с этим значительные потери, возникающие при нарушении рациональной последовательности работ и использования ресурсов [1]. Важность задачи КП

стимулировала большой интерес практиков к этой проблеме. Однако, на начальных этапах развития теории КП она представляла собой свод эмпирических правил [2]. Основы научного подхода были заложены в начале века в работах Ганта [3] и получили значительное развитие, стимулированное промышленной революцией [4]. Основные успехи были достигнуты в визуализации КП [5]. Наибольшее развитие получили сетевые методы календарного планирования [6,14–16]. В последнее время прогресс в исследовании теории и практики календарного планирования определяется широким внедрением вычислительной техники [7].

Однако, несмотря на значительный интерес к данной тематике и значительные усилия, направленные на совершенствования методов календарного планирования, многие практические задачи к настоящему времени не решены. Связано это с размерностью исследуемой системы «объект + ресурсы». Однозначно состояние этой системы может быть описано только в четырехмерном конфигурационном пространстве, координатами которого являются пространственный объект (помещение, земельный участок и т.п.), работа, ресурс, время. Полная четырехмерная задача в общем случае является NP-неразрешимой [8]. Поэтому на практике применяются эвристические методы [9] основанные на концепции не оптимального, а допустимого решения [10]. В частности, при построении календарных планов в рамках таких моделей выделяется единственный критерий оценки и оптимизации. Частными случаями такой постановки задачи является планирование по кратчайшему пути [11], метод непрерывного освоения фронта работ, метод непрерывного использования ресурсов и др. Однако столь упрощенный подход часто приводит к решениям весьма далеким от оптимальных [12, 13]. Поэтому основные проблемы планирования и управления так и остались нерешенными.

При этом именно совершенствование КП имеет важные преимущества над остальными методами оптимизации строительного проекта (в первую очередь–техно-технологическими). Эти преимущества определяются тем, что совершенствование КП не требует значительных материальных и временных затрат. Поэтому оптимизация КП по соотношению «затраты/отдача» имеет очевидные преимущества над остальными, вследствие чего должен использоваться в первую очередь. [13, 14]. Одним из методов оптимизации КП является организация рационального совмещения работ в пространстве и времени. Решению этой задачи посвящена данная работа.

2. Методы

Последовательность работ A и B связанных технологически, пространственно или организационно может быть описана безразмерными коэффициентами опережения – $(A/B)_o$, запаздывания – $(A/B)_z$, совмещения – $(A/B)_c$. Коэффициентом опережения работы A относительно работы B называется доля работы A , выполняемая до начала работы B . В частности, если работы A и B выполняются строго последовательно, то $(A/B)_o = 1$. Коэффициентом запаздывания работы A относительно работы B называется доля работы A , выполняемая после окончания работы B . Коэффициентом совмещения работы A относительно работы B называется доля работы A , выполняемая параллельно работе B .

В частности, если совмещение отсутствует и работы A и B выполняются строго последовательно, возможно и с временным разрывом, то справедливы равенства:

$$(A/B)_o = 1; (A/B)_z = (A/B)_c = 0; (B/A)_z = 1; (B/A)_o = (B/A)_c = 0. \quad (1)$$

Естественно, если работа B строго предшествует работе A система равенств (1) остается справедливой при замене $A \leftrightarrow B$.

Если работы являются частями единого процесса и выполняются строго параллельно, то выполняются условия:

$$(A/B)_c = (B/A)_c = 1; (A/B)_3 = (A/B)_0 = (B/A)_0 = (B/A)_3 = 0. \quad (2)$$

Учет возможности совмещения работ позволяет оптимизировать календарный план. Для реализации этой возможности определим комплексную работу (в дальнейшем – КР) как часть технологического процесса, в ходе реализации которого его состав не изменяется. Замена работы на комплексную работу в календарном плане позволяет описать совмещение процессов. Так например, при учете совмещения двух процессов A , B возможна реализация следующих пяти наборов КР (табл. 1). Пунктирными вертикальными линиями отражены границы комплексных работ.

Таблица 1

Варианты комплексных работ, включающий два технологических процесса A (верхняя горизонтальная линии) и B (нижняя горизонтальная линии)

Комплексные работы			Графическая иллюстрация
B	$A + B$	A	
Комплексные работы			Графическая иллюстрация
A	$A + B$	A	
A	$A + B$	B	
--	$A + B$	A	
--	$A + B$	--	

Часть комплексных работ может содержать лишь один технологический процесс (в рассмотренном примере A или B). Коэффициенты $(A/B)_0$, $(A/B)_3$, $(A/B)_c$ не являются независимыми, а связаны соотношением:

$$(A/B)_0 + (A/B)_3 + (A/B)_c = 1. \quad (3)$$

Поэтому в действительности для полного описания упорядочения пары работ необходимо задание лишь четырех коэффициентов. Для определенности в дальнейшем будем использовать только коэффициенты опережения и запаздывания: $(A/B)_0$, $(A/B)_3$, $(B/A)_0$, $(B/A)_3$, а коэффициенты совмещения выражаются из условия (3).

Возможно обобщение изложенного выше алгоритма учета совмещения и более чем двух работ. При учете совмещения Z процессов реализуется как максимум $(2Z - 1)$ комплексных работ. При совпадении границ работ число вариантов реализуемых КР

уменьшается (четвертая строка табл. 1) и в случае совпадения обеих границ становится равным единице (пятая строка табл. 1). В качестве примера на рис. 1 изображен один вариант набора КР для трех технологических процессов.

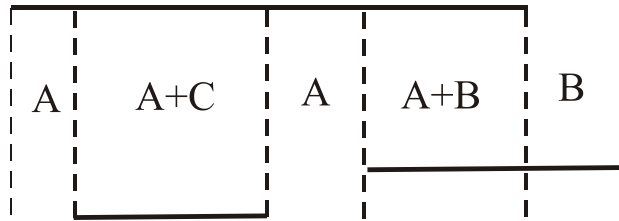


Рис. 1. Вариант набора пяти комплексных работ, содержащих три технологических процесса A , B , C

Дискретный характер нескладируемых ресурсов (в дальнейшем – НР), объемов работ и временных интервалов планирования накладывают ограничения на коэффициенты $(A/B)_0$, $(A/B)_3$, $(A/B)_c$. Связано это с тем, что при рациональном планировании выполнение полного объема работ должно быть обеспечено при использовании всех НР в течение целого числа промежутков планирования (в зависимости от подробности планирования – часов, рабочих смен, недель и т. п.). В противном случае возникают потери вследствие неполного использования ресурса в течение части промежутка планирования или необходимости перебазирования НР на другой участок, сопряженные с потерей рабочего времени и ресурсов.

Графически дискретизация параметров описания пространственно-технологических или организационных связей приводит к возникновению двух видов ограничений. Это, во-первых, необходимость дискретизации длин отрезков, описывающих длительности реализации комплексных работ. Во-вторых, дискретный характер имеет и множество допустимых значений координат границ отрезков, описывающих длительность реализации. В общем случае эти два дискретных множества несоизмеримы, вследствие чего решение практической задачи календарного планирования требует определения алгоритмов предпочтения указанных множеств.

Сформулируем условия рационального планирования количественно. Введем следующие обозначения: V_A и V_B – объемы работ A и B ; $P_{A,i}$, $P_{B,i}$ – мощность НР, то есть объемы, выполняемые за единичный временной интервал, для работы A и B соответственно. Здесь индекс i нумерует нескладируемый ресурс и принимает значения $i = 1, 2, \dots, R_n$ (R_n – общее количество НР). В частности, для ресурсов, не использующихся для выполнения работы, мощность принимает нулевое значение.

Условия полного выполнения работ в зависимости от способа их упорядочения принимают следующий вид:

$$T_{A \rightarrow A+B} \sum_{i=1}^{R_n} P_{A,i} = (A/B)_0 V_A; \quad T_{B \rightarrow A+B} \sum_{i=1}^{R_n} P_{B,i} = (B/A)_0 V_B; \quad (4)$$

$$T_{A \leftarrow A+B} \sum_{i=1}^{R_n} P_{A,i} = (A/B)_3 V_A; \quad T_{B \leftarrow A+B} \sum_{i=1}^{R_n} P_{B,i} = (B/A)_3 V_B; \quad (5)$$

$$T_{A+B} \sum_{i=1}^{R_n} P_{A,i} = [1 - (A/B)_0 + (A/B)_3] \cdot V_A; \quad (6)$$

$$T_{B+A} \sum_{i=1}^{Rn} P_{B,i} = [1 - (B/A)_0 + (B/A)_3] \cdot V_B. \quad (7)$$

Первое из уравнений (4) описывает выполнение части работы A , опережающей выполнение суммарной работы $A + B$, а второе из этих уравнений – выполнение части работы B , опережающей выполнение суммарной работы. Аналогично, уравнения (5) описывают выполнение частей работ A и B , запаздывающих по отношению к суммарной работе. Естественно, если коэффициент в правой части равенств (4) или (5) принимает нулевое значение, то нулевым будет и время реализации процесса. Уравнения (6) и (7) описывает части работ A и B , выполняемые параллельно.

Разделив обе части уравнений (4) – (7) на объем соответствующей работы, приведем их к совпадающему виду:

$$T_{\gamma \leftrightarrow \delta} \sum_{i=1}^{Rn} p_{\alpha,i} = (\alpha/\beta)_C. \quad (8)$$

Здесь $p_{\alpha,i} = P_{\alpha,i}/V_{\alpha}$ – удельная мощность ресурса, то есть доля соответствующей работы, выполняемая за один промежуток планирования. Индексы и параметры уравнения (9) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Индексы и параметры уравнения

№ уравнения	α	β	$(\alpha/\beta)_C$	$\gamma \leftrightarrow \delta$
(4.1)	A	B	$(A/B)_0$	$A \rightarrow A + B$
(4.2)	B	A	$(B/A)_0$	$B \rightarrow A + B$
(5.1)	A	B	$(A/B)_3$	$A \leftarrow A + B$
(5.2)	B	A	$(B/A)_3$	$B \leftarrow A + B$
(6)	A	B	$1 - (A/B)_0 + (A/B)_3$	$A + B$
(7)	B	A	$1 - (B/A)_0 + (B/A)_3$	$B + A$

В уравнении (9) переменная $T_{\gamma \leftrightarrow \delta}$ принимает целочисленные значения, а переменная $(\alpha/\beta)_C p_{\alpha,i}$ – рациональные. Следовательно, рациональными являются и значения коэффициентов:

$$(\alpha/\beta)_C = k/l, \quad (9)$$

где k, l – целые числа. Поэтому при рациональном планировании коэффициенты (9), а, следовательно, и коэффициенты опережения, совмещения и запаздывания, принимают дискретный ряд значений из технологически обусловленного интервала.

3. Результаты и обсуждение

Разберем пример определения дискретного набора рациональных значений коэффициентов опережения, совмещения и запаздывания двух работ, выполняемых в одном помещении. Для выполнения работы A возможно использование двух видов нескладируемых ресурсов (например, звеньев различной квалификации). Для выполнения работы B возможно использовать три вида ресурсов (например, двух звеньев различной квалификации и одного вида оборудования с персоналом). Параметры системы «работы + ресурс» приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры системы «работы + ресурс»

	Объем	Мощности элементарных ресурсов			Удельные мощности элементарных ресурсов			Максимальная кратность ресурса		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Работа <i>A</i>	11	1/5	1/3	-	1/55	1/33	-	3	4	-
Работа <i>B</i>	17	1/6	1/4	1/5	1/102	1/68	1/85	2	1	3

Мощности ресурсов выражены в условных единицах на продолжительность промежутка планирования

В таблице приведены мощности элементарных ресурсов (одного работника, единицы оборудования и т.п.). В зависимости от задачи планирования (минимизация срока выполнения работы, ритмичность выполнения работы, оптимизация использования ресурса и т.п.) реальные мощности в уравнениях (4) – (7) будут кратны элементарным мощностям (при использовании нескольких механизмов или работников). Кратными окажутся и удельные мощности.

Поскольку пространственные и технические условия накладывают ограничения на кратность каждого ресурса. Максимальное число элементарных ресурсов, которые могут одновременно использоваться в каждом помещении, приведено в трех последних колонках таблицы. С учетом данных, приведенных в табл. 2 уравнения (9) приобретают вид:

$$\begin{aligned} \left(\frac{k_1}{55} + \frac{k_2}{33}\right) T_{A \rightarrow A+B} &= (A/B)_O; \quad k_1 = 0, 1, 2, 3; \quad k_2 = 0, 1, 2, 3, 4. \\ \left(\frac{k_1}{102} + \frac{1}{68} + \frac{k_3}{85}\right) T_{B \rightarrow A+B} &= (B/A)_O \quad k_1 = 0, 1, 2; \quad k_3 = 0, 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (10)$$

Тот же вид имеют уравнения, описывающие соответствующие коэффициенты опережения. При замене в правой части уравнений (10) коэффициентов $(A/B)_O$ и $(B/A)_O$ на линейные комбинации $[1 - (A/B)_O + (A/B)_3]$ и $[1 - (B/A)_O + (B/A)_3]$ ту же форму приобретают и уравнения, описывающие коэффициенты совмещения. Поэтому полный набор рациональных коэффициентов определяется двумя уравнениями (10) при целочисленных значениях промежутков времени и при ограничениях $(A/B)_O \leq 1$ и $(B/A)_O \leq 1$.

В таблице 3 приведены значения коэффициентов опережения $(A/B)_O$ и запаздывания $(A/B)_3$ для первых четырех значений периодов планирования для системы «работы + ресурс», параметры которой приведены в таблице 2. Расчеты свидетельствуют о том, что ограничения $(A/B)_O \leq 1$ и $(B/A)_O \leq 1$ выполняются при $T < 12$. Максимальное допустимое значение коэффициентов достигается при $T = 15$, $k_1 = 2$, $k_2 = 1$.

В соответствии с уравнениями (6) и (7) коэффициенты опережения и запаздывания при одинаковых сроках выполнения работ не являются независимыми. Вследствие этого полностью рациональный выбор коэффициентов невозможен. Поэтому необходимо сформулировать алгоритм получения допустимых наборов коэффициентов, учитывающий возможность наличия резервов времени выполнения различных этапов работ.

Необходимость резервирования времени рассматривались в работе [15], однако задача оптимизации выбора величины резервов не ставилась.

Для оптимизации резерва времени модифицируем уравнение (8) и приведем его к виду:

$$(T_{\gamma \leftrightarrow \delta} + \Delta_{\gamma \leftrightarrow \delta}) \cdot \rho_{\alpha, k} = (\alpha/\beta)_C. \quad (11)$$

Здесь введены обозначения $\Delta_{\gamma \leftrightarrow \delta}$ – резерв времени выполнения этапа (опережающего, совмещенного, запаздывающего) работы α ;

$$\rho_{\alpha, k} = \sum_{i=1}^{R_n} k_{\alpha, i} \cdot p_{\alpha, i}, \quad (12)$$

есть сумма всех приведенных мощностей ресурсов, необходимых для реализации работы α , компоненты вектора $k = \{k_{\alpha, 1}, k_{\alpha, 2}, \dots, k_{\alpha, Rn}\}$ равны кратностям ресурсов. Значения суммарных приведенных мощностей приведены в таблице 4.

Выражая резерв времени $\Delta_{\gamma \leftrightarrow \delta}$ из уравнения (9), получим:

$$\Delta_{\gamma \leftrightarrow \delta} = \frac{(\alpha/\beta)_C}{\rho_{\alpha, k}} - T_{\gamma \leftrightarrow \delta}. \quad (13)$$

Таблица 4

Коэффициенты опережения и запаздывания для четырех значений периодов планирования

T	k_1	k_2	$(A/B)_0$	T	k_1	k_2	$(A/B)_0$
1	1	1	8/165	3	1	1	8/55
		2	13/165			2	13/55
		3	6/55			3	18/55
		4	23/165			4	23/55
	2	1	1/25		2	1	1/5
		2	16/165			2	16/55
		3	7/55			3	21/55
		4	26/165			4	26/55
	3	1	14/165		3	1	14/55
		2	19/165			2	19/55
		3	8/55			3	24/55
		4	29/165			4	29/55
2	1	1	16/165	4	1	1	32/165
		2	26/165			2	52/165
		3	12/55			3	24/55
		4	46/165			4	92/55
	2	1	2/15		2	1	4/15
		2	32/165			2	64/165
		3	14/55			3	28/55
		4	52/165			4	104/165
	3	1	28/165		3	1	56/165
		2	38/165			2	76/165
		3	16/55			3	32/55
		4	58/165			4	116/165

Таблица 5

Суммарные приведенные мощности (10) для работ A и B при различных значениях коэффициентов кратности

k_1	k_2	$\rho_{A,k}$	k_1	k_2	$\rho_{A,k}$	k_1	k_3	$\rho_{B,k}$	k_1	k_3	$\rho_{B,k}$
1	1	8/165	2	1	1/15	1	1	709/11220	2	1	83/1020
	2	13/165		2	16/165		2	1049/11220		2	1253/11220
	3	6/55		3	7/55		3	463/3740		3	531/3740
	4	23/165		4	26/165						

Общий резерв времени для всей работы равен сумме резервов (11) для опережающей, совмещенной и запаздывающей частей. В зависимости от конкретной ситуации этот резерв может быть перераспределен в пользу наиболее важных или рискованных частей комплексной работы.

Рассмотрим конкретный пример применения такого алгоритма. Пусть, например, наиболее важной является совмещенная часть комплексной работы. В этом случае резервы для опережающей и запаздывающей частей работ равны нулю и соответствующие коэффициенты для обеих работ определяются из уравнения (11) при $\Delta_0 = \Delta_3 = 0$.

$$(A/B)_0 = T_{A \rightarrow A+B} \cdot \rho_{A,k}; (B/A)_0 = T_{B \rightarrow A+B} \cdot \rho_{B,k} \quad (14)$$

И, следовательно, коэффициенты опережения и запаздывания могут быть получены из таблиц 2 и 3. Подставляя выражения (12) в формулы (6) и (7) с учетом (11) получаем уравнения, определяющие резерв времени в виде:

$$(T_{A+B} + \Delta_{A+B}) \cdot \rho_{A,k} = 1 - T_{A \rightarrow A+B} \cdot \rho_{A,k} + T_{B \rightarrow A+B} \cdot \rho_{B,k} \quad (15)$$

$$(T_{B+A} + \Delta_{B+A}) \cdot \rho_{B,k} = 1 - T_{B \rightarrow B+A} \cdot \rho_{B,k} + T_{A \rightarrow B+A} \cdot \rho_{A,k} \quad (16)$$

При практическом применении этого алгоритма важным является тот факт, что для выполнения опережающей и запаздывающей частей работ, все ресурсы используются максимально эффективно. Внутри каждого промежутка планирования (например – рабочей смены) нет необходимости изменять количество применяемых ресурсов каждого вида (с математической точки зрения – изменять коэффициенты k_i). Поэтому все изменения могут происходить только при выполнении совмещенной части, что экономит средства и рабочее время, идущие на перебазирование ресурса.

4. Выводы

Динамика выполнения работ, части которых могут выполняться параллельно, полностью описывается двумя безразмерными коэффициентами. В частности, можно задать доли их объемов, выполняющихся до и после параллельной части работ. При учете совмещения Z процессов реализуется как максимум $(2Z - 1)$ комплексных работ. Учет возможности совмещения работ позволяет оптимизировать календарный план.

Оптимальное планирование предполагает исключение потерь, возникающих вследствие неполного использования ресурса в течение части промежутка планирования или необходимости их перебазирования. Вследствие этого необходим учет дискретного характера ресурсов, объемов работ и временных интервалов планирования. Уравнения баланса ресурсов и работ имеют рациональные коэффициенты, что приводит к рациональным значениям и коэффициентов опережения, совмещения, запаздывания. На множестве рациональных чисел система уравнений баланса является несовместимой, что

практически приводит к невозможности полной оптимизации календарного плана. Возникающий внутрисменный резерв времени выполнения этапа (опережающего, совмещенного, запаздывающего) может быть перераспределен в пользу наиболее важных или рискованных частей комплексной работы. При практическом применении резерва времени для выполнения совмещенной в опережающей и запаздывающей частях работ, ресурсы используются максимально эффективно. При использовании резерва времени на запаздывающем этапе работ неизбежны потери, связанные с перебазированием ресурсов в течение промежутка планирования или неполного использования рабочего времени.

Список литературы

1. Воропаев В. И. Модели и методы календарного планирования в автоматизированных системах управления строительством. / В. И. Воропаев – Москва: Стройиздат, 1975. – 232 с.
2. Weaver P. A. Brief History of Scheduling: Back to the Future. / P. A. Weaver. - Hyatt. Canberra: Mosaic, Project Services Pty Ltd. - 2006. - P. 4 – 6.
3. Gantt H. L. Organizing for Work. / H. L. Gantt // USA, New York: Harcourt, Brace and Howe. - 1919. - P. 120.
4. Russell, A. D. M. A new generation of planning structures. / A. D. Russell, W. C. Wong, // Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 119 (2). - 1993. - P. 196–214.
5. Reda, R. M. RPM: Repetitive project modeling. / R. M. Reda // Journal of Construction Engineering and Management, 116(2). - 1990. – P. 316–330.
6. Ахьюджа Х. Сетевые методы управления в проектировании и производстве. / Х. Ахьюджа – Москва: Мир, 1979. – 641 с.
7. Skibniewski Mobile and Pervasive Computing in Construction. / Skibniewski, J. Mirosław // Construction Management and Economics - 2014. – vol. 32. P. 1148-1150.
8. Karp R. M. Reducibility among combinatorial problems. / R.M.Karp // In Complexity of Computer Computations, edited by R.E. Miller. Plenum Press. New York. - 1992. - P. 85-104.
9. Подчасова Т.П. Эвристические методы календарного планирования. / Т.П. Подчасова, В.М.Португал, В.В. Шкуба – Киев: Техника, 1980. – 144 с.
10. Дорф Р., Современные системы управления. / Р. Дорф, Бишоп – Москва: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 831 с.
11. Büchmann-Slorup, Rolf Applying critical chain buffer management theory in location-based management. / Büchmann-Slorup, Rolf // Construction Management and Economics. - 2014. – vol. 32, Number 6, P. 506-519(14).
12. Russell, A. D. Extensions to linear scheduling optimization. / A. D. Russell, W. F. Caselton, // Journal of Construction Engineering and Management, ASCE, 114(1). - 1988. - P. 36–52.
13. El-Rayes, K. Resource-driven scheduling of repetitive activities on construction projects. / K. El-Rayes, O. Moselhi // Journal of Construction and Economics. 16(4). - 1998. – P. 433–446.
14. Battersby A. Network Analysis for Planning and Scheduling. / A. Battersby // William Clowes and Sons. London - 1970.
15. Kreiner K. Organizational Behavior in Construction. / K. Kreiner // Construction Management and Economics. - 2013. – vol. 31, Number 11, P. 1165-1169(5).
16. Мищенко В.Я. Моделирование выполнения бригадами комплекса технологических процессов в организационно-технологическом проектировании / В.Я. Мищенко, Е.П. Горбанева, С.Ю. Арчакова, М.Г. Добросоцких // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. Серия «Инновационная экономика: человеческое измерение»: научно-практический и методологический журнал. – 2017. – №6. – С. 37-43.
17. Мищенко В.Я., Горбанева Е.П., Йюн Р., Фан Н.Л. Применение поточного метода строительства малоэтажной городской жилой застройки в условиях жаркого климата / В.Я. Мищенко, Е.П. Горбанева, Р. Йюн, Н.Л. Фан // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. - 2015. - №3 (39). - С. 28-38.
18. Мищенко В.Я. NP-разрешимая задача календарного планирования строительства, реконструкции и ремонта объектов / В.Я. Мищенко, М.Г. Добросоцких // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности: сб научн. ст. – Иваново: ИГТА, 2016. - №6 (366). - С. 13-20.